

DOI: 10.19807/j.cnki.DXS.2025-04-063

# 综合物探方法在浙西北找矿中的应用

## ——以某铜金矿为例

王 军<sup>1</sup>, 吴宏达<sup>1,2</sup>, 王汉卿<sup>1</sup>

(1. 浙江省工程物探勘察设计院有限公司, 浙江 杭州 310000; 2. 浙江省地球物理技术应用研究所有限公司, 浙江 杭州 310000)

**[摘 要]** 为查明浙西北某铜金矿深部矿产资源空间分布, 建立成矿模式和三维地质找矿预测模型, 对圈定的有利赋矿位置进行钻探验证。在地质工作的基础上, 针对常山地区重要矿致异常和含矿构造带, 开展以激电中梯剖面测量和可控源音频大地电磁测深测量为主的物探工作方法, 圈定了勘查区域激电异常, 并对地层在纵深方向分布情况进行厘定。同时结合地质情况, 分析研究了深部地层结构和控矿断裂发育情况, 为勘查区进一步矿产勘查提供依据。

**[关键词]** 综合物探; 激电中梯; 可控源音频大地电磁测深; 常山地区

**[中图分类号]** P618.41 **[文献标识码]** B **[文章编号]** 1004-1184(2025)04-0204-03

### 0 引言

浙西北某铜金矿地处钦杭成矿带东段、江山—绍兴拼合带北西、萧山—球川断裂带南西段两侧, 属里山岭—兰花坞铜金 V 级成矿远景区<sup>[1]</sup>。勘查区内分布的岩体为成矿岩体, 地表岩体北东向带状出露, 深部有规模较大的隐伏岩体, 水系沉积物显示 Au、Ag、Cu、Pb、Zn 等综合异常规模较大, 浅部已发现品位较好的铜、银铅锌工业矿体, 故勘查区具有利的成矿地质条件, 找矿远景较好。

随着浅、近地表矿产的逐渐摸清, 深部矿产的赋存情况更值得研究。目前对深部矿产的勘查, 主要手段集中在地质—地球物理—地球化学模型的建立, 同时辅以少量的大深度的钻探验证工作。这其中地球物理勘查手段最为经济高效<sup>[2-4]</sup>。

本文通过在勘查区内开展综合物探测量, 圈定了激电异常, 查明了深部地层结构和控矿断裂展布形态, 为重点找矿靶区划分和钻探布设提供依据, 取得了较好的找矿效果。

### 1 地质及地球物理特征

#### 1.1 地层

勘查区隶属扬子地层区, 江南地层分区, 出露地层有奥陶系上统长坞组 ( $O_3c$ )、三衢山组 ( $O_3s$ )、文昌组 ( $O_3w$ )、志留系中下统康山组 ( $S_{1-2}k$ )、中统唐家坞组 ( $S_2t$ )、泥盆系上统西湖组 ( $D_3x$ )、珠藏坞组 ( $D_{cz}$ )、石炭系下统叶家塘组 ( $C_{1y}$ ) 和第四系 ( $Q$ )。

#### 1.2 构造

勘查区主要褶皱为球川—上方复式向斜南西段, 该褶皱核部地层为大面积分布的志留系中统唐家坞组 (泥盆系、石炭系受断裂构造破坏, 仅局部分布), 北西翼地层依次为康山组第三段、第二段、第一段, 奥陶系文昌组和长坞组, 南东翼为奥陶系长坞组 (三衢山组)。该向斜由于北东向和北西向断裂构造影响, 使其形态复杂化, 并形成次一级褶皱。

勘查区主要发育有北东向和北西向两组断裂, 此外还有北北东断裂。球川—萧山大断裂贯穿全区, 规模最大, 构成北东向的基本构造骨架, 该断裂具有多期次活动的特征, 早期以压性及扭性为主, 中生代以后主体为张性特征, 并在该时代有花岗斑岩等多次侵入, 这些花岗斑岩与铜矿、金银矿的成矿关系密切; 北西向断裂总体规模较小, 大都错切北东向断裂; 北北东向断裂形成时间较晚, 破坏了早期形成的褶皱、断层构造, 以左行走滑性质为主。

#### 1.3 岩浆岩

勘查区岩浆活动频繁且强烈, 以侵入中酸性岩脉 (体) 为主, 岩性主要为二长花岗 (斑) 岩、花岗 (斑) 岩、霏细 (斑) 岩等, 区内的角岩化、铜多金属矿化与其密切相关。

表 1 勘查区电阻率和极化率参数统计表

地层	岩性	电阻率/ $\Omega \cdot m$		极化率/%	
		平均值	变化范围	平均值	变化范围
文昌组	钙质泥岩	2 660	1 528 ~ 3 789	0.94	0.17 ~ 1.36
长坞组	泥岩	765	523 ~ 1 405	2.77	1.23 ~ 3.04
三衢山组	灰岩	1 585	—	2.02	—
康山组	砂岩	3 082	2 131 ~ 4 043	1.27	0.25 ~ 1.73
—	花岗斑岩	4 511	649 ~ 8 538	2.23	0.04 ~ 3.52
—	霏细斑岩	113	—	1.86	—
—	硅化碎裂岩	2 422	1 628 ~ 3 215	1.51	1.04 ~ 1.98

#### 1.4 地球物理特征

岩 (矿) 石的地球物理特征主要与岩石的结构、构造和物质成份相关, 掌握研究区岩 (矿) 石地球物理特征是物探测量和资料解释工作的前提<sup>[5-7]</sup>。施工期间对工区内各种主要岩性的野外露头进行了物性测定工作, 了解了区内主要岩性的视电阻率及视极化率状况, 统计结果见表 1。

区内各地层岩性的物性特征有一定差异, 为地球物理勘查提供了较好的物性前提。此外完整基岩的电阻率为相对

**[收稿日期]** 2024-10-26

**[作者简介]** 王军 (1980-), 男, 浙江金华人, 助理工程师, 主要从事地热资源勘查及地下管线精探等相关工作。

高阻,如果基岩破碎或者基岩中有裂隙就会含水,则会降低电阻率,表现为低阻特征。

## 2 工作方法

### 2.1 激电中梯

激电中梯方法是一种利用直流激发极化法进行地质勘探的技术,主要用于探测地下矿体和岩体的分布情况<sup>[8-9]</sup>。该方法通过测量视电阻率( $\rho_s$ )和视极化率( $\eta_s$ )来推断地下地质结构。其基本原理是利用直流电场激发地下介质产生极化效应,通过测量电场中的电压变化来计算视电阻率和视极化率。视电阻率反映了地下介质的导电性,而视极化率则反映了介质的极化特性。

通过对勘查区地质资料的分析,本次激电中梯分为三个区域,编号为1号、2号、3号,共布设20条测线,每条测线长500 m,网度100 m×20 m(图1)。野外实际采用一线供电多线观测的工作方式,供电线为主测线,每次工作时供电线和测量线共同称为一个排列。

### 2.2 可控源音频大地电磁测深

可控源音频大地电磁法(CSAMT)是一种基于音频大地电磁法(AMT)和大地电磁测深法(MT)发展起来的人工源频率域测深方法<sup>[10]</sup>。它使用人工发射源替代天然源,通过扫描特定的频率范围,生成地面的深度剖面电阻率模型,广泛应用于矿产资源、油气、地热及工程勘查等领域。

可控源大地音频电磁法测深(CSAMT),是基于电磁波传播理论和麦克斯韦方程组导出的水平电偶极源在地面上的电场及磁场公式,并经过一些简单运算,可获得视电阻率 $\rho_s$ 公式(1)。

$$\rho_s = \frac{1}{5f} \frac{|E_{xl}|^2}{|H_{yl}|^2} \quad (1)$$

根据电磁波的趋肤效应理论,导出趋肤深度H公式(2)。

$$H \approx 365 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (2)$$

从公式(1)、公式(2)可知,当地表电阻率固定时,电磁波的传播深度(或探测深度)与频率成反比,高频时,探测深度浅,低频时,探测深度深。

本次可控源大地音频电磁法测深工作共布设3条剖面,编号分别为SK1、LK1、CK1,分布在工区3个区域,其中SK1、LK1长度均为2 100 m,CK1长2 400 m(图1)。

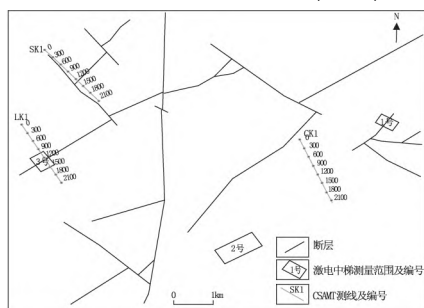


图1 勘查区构造纲要及地球物理勘查实际工作图

## 3 资料推断解释

### 3.1 激电中梯异常特征

#### 3.1.1 1号测区

如图2所示,1号测区视极化率平面图中,中部呈高极化率区域,呈椭圆状, $\eta_s = 3.6\% \sim 5.2\%$ ,与之对应的视电阻率

呈低阻异常,走向北东,结合地质资料,此处异常与北东走向的构造位置相吻合,且异常中心位于构造与地质界线交汇处,推测此处为构造与地层接触带共同作用引起的异常,为找矿有利部位;测区西部、东部和北部各有一处低阻-高极化异常, $\eta_s = 3.6\% \sim 4.4\%$ ,结合地质资料,三处异常均位于地层接触带附近,推测异常为地层接触带附近金属硫化物富集的反映,三处异常均未闭合。

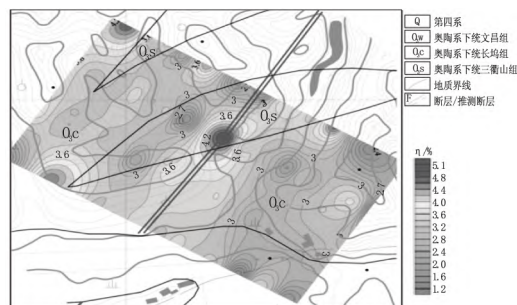


图2 1号测区激电中梯视极化率( $\eta_s$ )等值线平面图

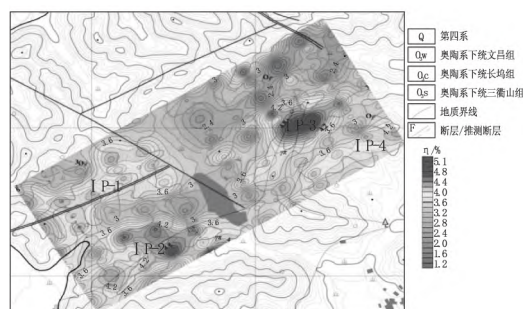


图3 2号测区激电中梯视极化率( $\eta_s$ )等值线平面图

#### 3.1.2 2号测区

如图3所示,以 $\eta_s = 3.6\%$ 作为异常背景值,2号测区激电异常区主要分布在勘查区的南西和南东一带,共划分了四个异常区。

(1) IP-1异常分布在测区的西部,呈条带状,为低阻-高极化异常; $\eta_s = 3.6\% \sim 4.6\%$ ,异常带贯穿1线~5线,异常走向北东,异常带延伸出工作区范围外,向西侧未闭合;根据地质资料,异常位于断裂构造带附近,推测该异常为构造带附近金属硫化物富集的反映。

(2) IP-2异常分布在IP-1异常区南侧,为低阻-高极化异常; $\eta_s = 3.6\% \sim 5.4\%$ ,异常带贯穿1线~5线,呈北东向,异常带延伸出工作区范围外,向西侧及南侧未闭合;根据地质资料,异常位于长坞组与花岗岩接触带附近,推测该异常为地层接触带附近金属硫化物富集的反映。

(3) IP-3异常分布在测区北东侧的中部,为低阻-高极化异常, $\eta_s = 3.6\% \sim 5.8\%$ ,异常带贯穿6线~10线,呈椭圆形的高值闭合圈异常,走向北东向;根据地质资料,异常位于长坞组与花岗岩接触带附近,推测该异常为地层接触带附近金属硫化物富集的反映。

(4) IP-4异常分布在测区北东侧的南部,为高阻-高极化异常, $\eta_s = 3.6\% \sim 4.4\%$ ,异常带贯穿6线~11线,呈条带状分布,走向北东向。

#### 3.1.3 3号测区

如图4所示,3号测区整体极化率较低,以 $\eta_s = 1.7\%$ 作为异常背景值,激电异常区主要分布在勘查区的中部位置, $\eta_s = 1.7\% \sim 3.0\%$ ,呈条带状,走向北东,在视电阻率平面图

中,异常位于等值线梯级带上;根据地质资料,异常位于断层 F3 附近,推测该异常为构造带附近金属硫化物富集的反映。

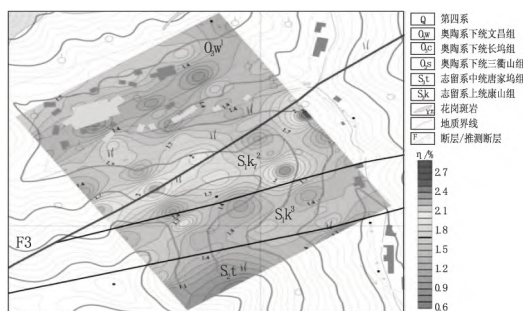


图 4 3 号测区激电中梯视极化率( $\eta_a$ )等值线平面图

### 3.2 CSAMT 资料解释

#### 3.2.1 SK1 剖面推断解释

如图 5 所示,SK1 线在 1300/SK1 下方存在高低阻接触带和等值线呈阶梯状,推断为断层反映,结合地质资料,此处断层与 F2 位置吻合,推测为同一断层。结合地质资料,推测 SK1 线里程 0~1 500 m、1 800~2 100 m 浅部的相对低阻为奥陶系文昌组( $O_3w$ )或奥陶系长坞组( $O_3c$ ),文昌组( $O_3w$ );里程 1 500~1 800 及 1 800~2 100 m 中深部的相对高阻为花岗岩岩( $\gamma\pi$ ),地表有出露。

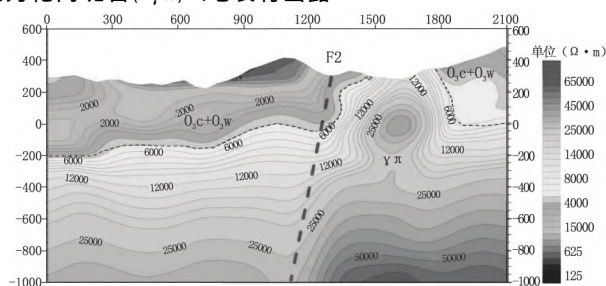


图 5 SK1 线推断解释成果图

#### 3.2.2 LK1 剖面推断解释

如图 6 所示,LK1 线在 350/LK1、1250/LK1 下方存在高低阻接触带和等值线呈阶梯状,推断为断层反映。结合地质资料,1 250/LK1 处断层与 F3 位置吻合,推测为同一断层,350/LK1 处断层在地质图中未有反映,编号 Fw1。结合地质资料,推测 LK1 线里程 0~350 m 浅部的相对中阻为奥陶系文昌组( $O_3w$ ),里程 350~1 250 m 的相对高阻为花岗岩岩( $\gamma\pi$ ),地表有出露,里程 1 250~2 100 m 浅部相对低阻为志留系康山组( $S_1k$ )或志留系唐家坞组( $S_2t$ )。

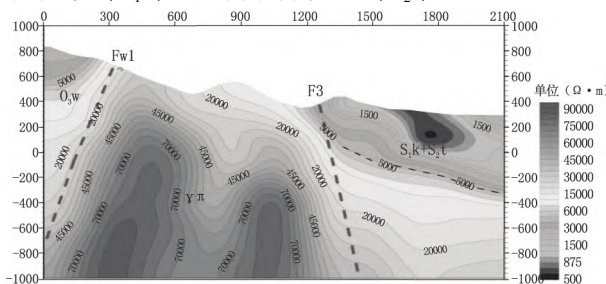


图 6 LK1 线推断解释成果图

#### 3.2.3 CK1 剖面推断解释

如图 7 所示,CK1 线在 650/CK1、1 700/CK1 下方存在高低阻接触带和等值线“V”型下凹,推断为断层反映。结合地质资料,650/CK1 处断层与 F12 位置吻合,推测为同一断层,

1 700/CK1 处断层在地质图中未有反映,编号 Fw2。结合地质资料,推测 CK1 线里程 0~650、1 400~2 200 m 浅部的相对低中阻为奥陶系长坞组( $O_3c$ ),里程 850~1 400 m 的由浅至深柱状高阻异常为花岗岩岩( $\gamma\pi$ ),岩体在地表有出露,由此推测里程 1 500~2 200 m 中深部的高阻异常为花岗岩岩( $\gamma\pi$ ),在地表未出露,为隐伏岩体。

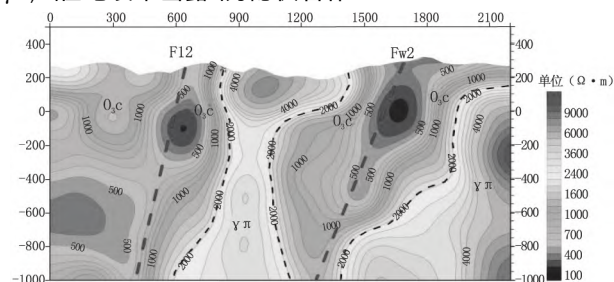


图 7 CK1 线推断解释成果图

## 4 结语

(1) 通过激电中梯剖面测量,圈定了激电异常部位,查明了激电异常分布范围。激电异常主要反映为金属硫化物富集特征;且与地层接触带、断裂构造带密切相关。

(2) 通过可控源音频大地电磁测深工作,了解了靶区内的主要断裂构造及隐伏岩体等地质情况,查明深部矿体赋存空间部位和所反映的物探异常特征的对应关系,为钻探验证提供依据。

(3) 推测物探异常为花岗岩岩体引起,深部钻探工程证实了物探推断的隐伏岩体确实存在,岩体与成矿关系密切,侵入前峰部位和岩脉分布较密集地段,矿化富集,产于岩体外接触带之中。岩体边部和内部广泛发育蚀变,与成矿关系较为密切。

### 参考文献

- [1] 焦智伟,王亚飞,汪来,等. 综合物探在黔西北猪拱塘地区铅锌矿找矿中的应用[J]. 中国矿业. 2024. 33(1): 566-572.
- [2] YU P L, QU T, HE R Z, et al. Application of tensor CSAMT with high-power orthogonal signal sources in Jiama porphyry copper deposit, South Tibet[J]. China Geology. 2023. 6(1): 37-49.
- [3] SUN H Y, SUN X M, WEI X F, et al. Geochemical characteristics and origin of Nuanquanzi Geothermal Water in Yudaokou, Chengde, Hebei, North China[J]. Journal of Earth Science. 2023. 34(3): 838-856.
- [4] 薛东旭,刘诚,郭发,等. 基于土壤氡气测量和可控源音频大地电磁的陕西眉县汤峪地热预测[J]. 物探与化探. 2023. 47(5): 1169-1178.
- [5] CHENG S, ZHANG Z Y, ZHOU F, et al. 3D step-by-step inversion strategy for audio magnetotellurics data based on unstructured mesh[J]. Applied Geophysics. 2021. 18(3): 375-385.
- [6] WANG T, WANG K P, TIAN H D. Forward modeling and inversion of tensor CSAMT in 3D anisotropic media[J]. Applied Geophysics. 2017. 14(4): 590-605.
- [7] 朱义坤,赵景怀,缪旭煌,等. 综合物探方法在蚌埠隆起多金属矿勘查中的应用—以怀远双沟勘查区为例. 华东地质. 2023. 44(1): 82-91.
- [8] 郭建平. 新疆昭苏县阿登套铜金矿地质特征及控矿因素[J]. 新疆有色金属. 2021(1): 12-13.
- [9] 何继善. 可控源音频大地电磁法[M]. 长沙: 中南工业大学出版社. 1990.